

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

### IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GOTAS (DSD) CON LA RELACIÓN REFLECTIVIDAD (Z) - RANGO DE LLUVIA (R), EN EL PÁRAMO DE LA MICROCUENCA DEL ZHURUCAY.

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

**AUTOR:**

OLMEDO XAVIER PAUTA LUNA  
CI: 0105045157

**DIRECTOR:**

ING. ROLANDO ENRIQUE CÉLLERI ALVEAR, PhD  
CI: 0602794406

**TUTORA:**

ING. JOHANNA ORELLANA ALVEAR, MSc  
CI: 0104162268  
CUENCA –ECUADOR  
2017



## RESUMEN

La distribución de gotas de lluvia (DSD) da respuesta a los procesos de precipitación a un nivel microfísico, tomando en cuenta variables como  $N(D_i)$  y  $(D_m)$ , el estudio clasifica la lluvia mediante la variabilidad del  $D_m$  sobre un evento de lluvia. Después, obteniendo distribuciones para cada tipo y de esta manera observar relaciones y diferencias entre cada tipo a escala temporal. Junto con la DSD es necesario la caracterización de lluvia con relación Z-R, para obtener constantes  $(a-b)$  ajustadas a nuestra microfísica de gotas. Se utilizaron datos de precipitación del disdrómetro (Thies Clima), sobre la microcuenca del Zhurucay, la base de datos fue de 710 eventos correspondientes a 2 años, (2012-2014). Se trabajó con 4 tipos de lluvias: First Stratiform(FS), Second Stratiform(SS), Initial Convective(IC) y Continue Convective(CC), las cuales fueron clasificadas por periodos de tiempo mensual. Los resultados mostraron distribuciones de gotas diferentes en cada tipo para todos los meses. Además, abril y julio generaran tipos de lluvia intensas con gotas de diámetros de hasta 8 mm, conociendo posibles impactos de erosividad en este periodo. Con la caracterización de Z-R obtenidas por regresión mostró diferencia de las constantes para cada tipo de lluvia. El estudio es realmente útil para conocer la estructura de la lluvia a nivel específico para zonas de alta montaña, además es el primero en obtener una clasificación de lluvia por medio de la variabilidad del diámetro de gotas y finalmente se obtienen valores de constantes específicamente para zonas de paramo.

**Palabras clave:** distribución de gotas, caracterización Z-R, diámetro medio de volumen, parámetros a-b, regresión, precipitación, Zhurucay.



## ABSTRACT

Raindrop distribution responds to the precipitation process into a microphysical level, taking into account variables like  $N(D_i)$  and the mean ( $D_m$ ); which classify the rain, through  $D_m$  variability on a case of rain. Afterwards, raindrop distribution  $N(D_i)$  was obtained based on the classification. By this way, it was possible to observe the relationship and differences that exists between each other. In association with DSD, rain characterization is necessary, with relation Z-R, in order to obtain constants ( $a - b$ ) that fits precisely to each type of obtained rain. Data from precipitation from the disdrometer (Thies Clima), located in Zhurucay micro-basin, were collected. The project included a database of 170 cases corresponding to a two-year period (2012-2014). The DSD worked with 4 types of rain: First Stratiform(FS), Second Stratiform(SS), Initial Convective(IC) and Continue Convective(CC), which were classified by monthly periods. DSD results showed that the raindrop distribution for each type of rain was different, demonstrating the different inclination and forms of raining in specific months. Moreover, April and July generated two types of intense rain, with drop of 8mm of diameter, knowing possible impacts of erosivity in this period. The characterization of Z-R obtained through a regression showed that the constants for each type of rain had different values. The study proved the existence of different types of rain at high mountain areas and the difference among each other through their distribution and in the value of constants that can be useful for future research and conservation studies.

**Keywords:** drop size distribution, Z-R characterization, mean volume diameter, a-b parameters, regression, precipitation, Zhurucay.



## Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1. ANTECEDENTES .....	11
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN .....	11
Objetivos .....	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos.....	13
2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	13
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	13
3.2. MEDICIONES DE DATOS METEOROLÓGICOS .....	16
3.3. METODOLOGÍA .....	19
2.3.1. Base de datos para eventos de lluvia.....	19
2.3.2. Clasificación de cada evento de lluvia en base al diámetro medio de volumen (Dm).....	20
2.3.3. Distribución del tamaño de las gotas de lluvia a partir del cálculo $N(D_i)$ para cada observación. ....	25
2.3.4. Caracterización con la relación Z-R para obtener parámetros a-b. ....	26
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1. DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE GOTAS POR TIPO DE LLUVIA .....	28
4.2. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GOTAS POR TIPO DE LLUVIA A ESCALA ANUAL. ....	30
4.3. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GOTAS DE LLUVIA POR TIPO DE LLUVIA A ESCALA MENSUAL .....	32
4.4. ....	36
3.4. PARAMETROS DE RELACION Z-R POR TIPO DE LLUVIA .....	36
3.5. PARAMETROS DE LA RELACION Z-R A NIVEL MENSUAL Y POR TIPO DE LLUVIA.....	38
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
5. BIBLIOGRAFÍA.....	41
Anexos.....	44



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ilustración geográfica del observatorio ecohidrológico.....	14
<b>Figura 2</b> Observatorio ecohidrológico para la zona de Zhurucay.....	16
<b>Figura 3</b> Laser Precipitation Monitor ó Disdrómetro Laser Thies.....	17
<b>Figura 4</b> Pasos generales para el análisis de datos[JO1][JO2].....	19
<b>Figura 5</b> Pre-clasificación de lluvia Stratiform y Convective.....	22
<b>Figura 6</b> Sub-clasificación de lluvias First Stratiform (FS) y Second Stratiform (SS).....	23
<b>Figura 7</b> Sub-clasificación de lluvias Initial Convective (IC) y Continue Convective (CC).....	24
<b>Figura 8</b> Distribución de tamaño de gotas para los tipos de lluvia: (A) first stratiform, (B) second stratiform, (C) initial convective y (D) continue convective..	28
<b>Figura 9.</b> Distribución de tamaño de gotas para los tipos de lluvia: (A) first stratiform, (B) second stratiform, (C) initial convective y (D) continue convective a escala mensual.....	30
<b>Figura 10</b> Conjunto de ilustraciones para distribuciones de tipos [JO3]de lluvia por meses del año.....	33
<b>Figura 11</b> Conjunto de parámetros de relación Z-R por tipo de lluvia: (A) first stratiform, (B) second stratiform, (C) initial convective y (D) continue convective..	36
<b>Figura 12</b> Conjunto de parámetros de relación Z-R por tipo de lluvia: (A) first stratiform, (B) second stratiform, (C) initial convective y (D) continue convective a escala mensual.....	38



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Tabla de velocidades y diámetros medibles por el disdrómetro.....	18
<b>Tabla 2</b>	Esquema de datos por evento de precipitación.....	21
<b>Tabla 3</b>	Pruebas de valores para clasificación de tipo de lluvia.....	25



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Olmedo Xavier Pauta Luna, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GOTAS (DSD) CON LA RELACIÓN REFLECTIVIDAD (Z) - RANGO DE LLUVIA (R), EN EL PÁRAMO DE LA MICROCUENCA DEL ZHURUCAY", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 08 de diciembre de 2017

Olmedo Xavier Pauta Luna

C.I: 0105045157



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Olmedo Xavier Pauta Luna, autor/a del trabajo de titulación "IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GOTAS (DSD) CON LA RELACIÓN REFLECTIVIDAD (Z) - RANGO DE LLUVIA (R), EN EL PÁRAMO DE LA MICROCUENCA DEL ZHURUCAY", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 08 de diciembre de 2017

Olmedo Xavier Pauta Luna

C.I: 0105045157





## AGRADECIMIENTO

Con admiración agradezco al Ing. Rolando Céleri Alvear, PhD por su guía enseñanza y consejo a lo largo de la creación de este trabajo de titulación y de manera especial a la Ing. Johanna Orellana Alvear, MSC, por su paciencia, supervisión y virtud de enseñar, la cual ha logrado que se llegue a cumplir un objetivo más en mi vida. Al grupo de trabajo del Departamento de Recurso Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca que brindo siempre su ayuda no solo en conocimientos sino en motivación. A mis padres y hermanos que siempre representaron una parte esencial en el cumplimiento de este objetivo.

Olmedo Xavier Pauta Luna,

Cuenca, Diciembre de 2017



## 1. INTRODUCCIÓN

El páramo es un ecosistema de humedales alpino neotropical que se ubica entre el límite superior del bosque (3500 m s.n.m) y las nieves perpetuas (5000 m s.n.m aproximadamente). El páramo se lo define como un paisaje de planicies y valles accidentados de origen glaciar, el cual posee un gran número de lagunas, praderas húmedas y pantanos (Mena Vásconez & Hofstede, 2010). En el sur del Ecuador este tipo de ecosistema posee suelos volcánicos poco profundos y porosos con un alto contenido de materia orgánica. A nivel climatológico los páramos al sur del Ecuador son considerados por una presión atmosférica baja, alta radiación ultravioleta y fuertes vientos de dirección variable, la temperatura promedio es de 7 °C, a 3500 m s.n.m (Córdova, Carrillo, & Céleri, 2013). Las diversas características topográficas, hidrológicas y meteorológicas provocaron que este ecosistema albergue una calidad de agua excelente y las fuentes de agua que descienden mantengan un flujo contante, denominándola como una fuente de suministro de agua que aporta en el manejo sustentable de los recursos naturales Celleri et al., 2007). No obstante a pesar de su gran variedad de servicios ambientales, sociales y económicos, existen muy pocos estudios sobre procesos hidrológicos, evapotranspiración, meteorológicos, etc. (Padrón, 2013), lo cual limita el desarrollo de conocimiento. Esto se manifiesta de igual forma para la precipitación, la cual se la considera como parte importante del ciclo hidrológico, y un referente del estado de los ecosistemas, sin embargo, existe un gran vacío para entender su comportamiento, por lo que es necesario estudiar su estructura y variabilidad a partir de su distribución.

La precipitación es un fenómeno climatológico, se lo define como cualquier forma de hidrometeoro que cae sobre la atmosfera y llega a la superficie terrestre. Existen varios tipos de precipitación que aportan a este fenómeno como son nieve, lluvia, neblina, rocío, granizo, llovizna, aguanieve y neviscas. De los cuáles los más comunes en el páramo son la llovizna, lluvia y granizo. La precipitación contribuye en procesos como la erosión, y sus efectos ambientales, sociales y económicos, dan respuesta a eventos ocurridos a pequeña y gran intensidad, aporta en la



calibración de radares meteorológicos para un mejor desempeño en el estudio de precipitación y es parte fundamental en la creación de planes de gestión y manejo de ecosistemas de alta montaña para una contribución social y económica (WMO, 2010). Según (Padrón, 2013) el estudio de la precipitación en la actualidad no ha revelado aun una comprensión total de su comportamiento e incluso indica que existen aún muchos vacíos de conocimiento, específicamente en zonas de páramo. Becker and Bugmann 1999, afirman que tanto las condiciones meteorológicas e hidrológicas varían drásticamente en ecosistemas de alta montaña, generando problemas para poder describir y estimar procesos de la precipitación.

### **1.1. ANTECEDENTES**

La precipitación ha sido constantemente un tema de estudio, sin embargo, el comprender su comportamiento y distribución siempre ha resultado controversial. Las investigaciones encontradas muestran una parte muy pequeña de lo que se conoce sobre este tema e incluso es mínimo las investigaciones que se han basado sobre ecosistemas de alta montaña; publicaciones como (Celleri et al., 2007) y (Campozano et al., 2016) son proyectadas a gran escala sobre estudios de variabilidad de precipitación y sistemas de variación de las gotas de lluvia respectivamente, investigaciones a meso escala (Pauta & Céleri, 2015) y (Checa, 2011) se basan en errores de estimación de precipitación sobre el páramo, mediciones de la variabilidad de la lluvia y de la distribución de las gotas de lluvia, a escala de microcuenca es el caso de Vuille, Bradley, & Keimig, 2000; Atlas et al., 1999; Buytaert et al., 2006, mientras que a escala puntual (Padrón, 2013) realiza el análisis de la estructura de la lluvia, cuya investigación se asemeja más a este tema y contribuye con su objetividad.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

Durante la búsqueda de investigaciones se encontró vacíos de conocimiento sobre este tema. El comportamiento de la lluvia, su distribución, el análisis de la estructura son algunos de los temas que no han sido investigados a detalle para dar respuesta a la dinámica de la precipitación. Estas incógnitas y el desconocer la tendencia que



tiene la lluvia en el páramo genera mayores interrogantes sobre la variabilidad de la lluvia. Poder dar respuesta a esta distribución es realmente arduo y costoso debido a que sería necesario contar con una red de miles de pluviómetros sobre el área de estudio (Ministerio del Ambiente, 2012), sin embargo es económicamente alto poder realizarlo, por lo que existen otras posibilidades como el análisis de la lluvia con DSD (Drop Size Distribution) y la caracterización Z-R.

La distribución de gotas de lluvia (DSD), puede realizarse con la obtención de la ecuación  $N(D_i)$ , siendo el número de gotas que cae sobre un diámetro y velocidad específica, el  $D_m$  (Diámetro medio de volumen), y ciertos parámetros que entrega el disdrómetro de marca Thies Clima, como es el espectro de gotas (matriz diámetros por velocidades), (Adolf Thies, 2010).

La distribución del tamaño de las gotas de lluvia (DSD) es esencial para entender los procesos de precipitación, estimar y mejorar la parametrización de la microfísica en modelos numéricos de nubes. Relativamente ningún estudio [JO4] se ha centrado en el DSD para zonas de páramos andinos. Han existido varios estudios en zonas tropicales o ecuatoriales para mediciones de DSD como es el caso de (Maki et al., 2001) cuyo objetivo fue analizar las características del DSD en 15 líneas de ráfagas tropicales observadas con el disdrómetro de impacto de Joss-Waldvogel, ellos mostraron diferencias en los patrones DSD entre el tipo convectivo y estratiformes de la línea de la tormenta. Nzeukou et al. (2004) y Moumouni et al. (2008) estudiaron las características de DSD de las tormentas tropicales utilizando datos disdrométricos recogidos en Dakar (Senegal) y Benin en África Occidental. Los DSD's obtenidos, se centraron principalmente en diferenciar dos tipos de lluvia (convectiva y estratiforme) o tres regiones de precipitación (línea convectiva, estratificación y transición). Muchos estudios han demostrado la variabilidad espacial a pequeña escala y sus parámetros de precipitación integral, especialmente para precipitaciones convectiva Jaffrain & Berne, 2012; Jameson, Larsen, & Kostinski, 2015.

En el análisis de literatura no se han encontrado investigaciones referentes a la distribución de gotas de lluvia o relaciones Z-R para ecosistemas de alta montaña,



por lo que existe un gran vacío de conocimiento. Por este motivo el objetivo de este trabajo es identificar del comportamiento temporal de la precipitación para la distribución de tamaño de gotas (DSD) con la relación reflectividad (Z) - rango de lluvia (R), en el páramo de la microcuenca del Zhurucay. El propósito es obtener una mejor comprensión de la variabilidad espacio-temporal de la lluvia en los Andes del Ecuador a escala de microcuenca. Para el presente estudio se utilizó solamente un disdrómetro para medir la precipitación definido como LPM 1 Thies clima el cual se encontró ubicado en la microcuenca Rircay como se muestra en la Figura. 1.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Identificación del comportamiento temporal de la precipitación para la distribución de tamaño de gotas (DSD) con la relación Reflectividad (Z) - Rango de lluvia (R), en el páramo de la microcuenca del Zhurucay.

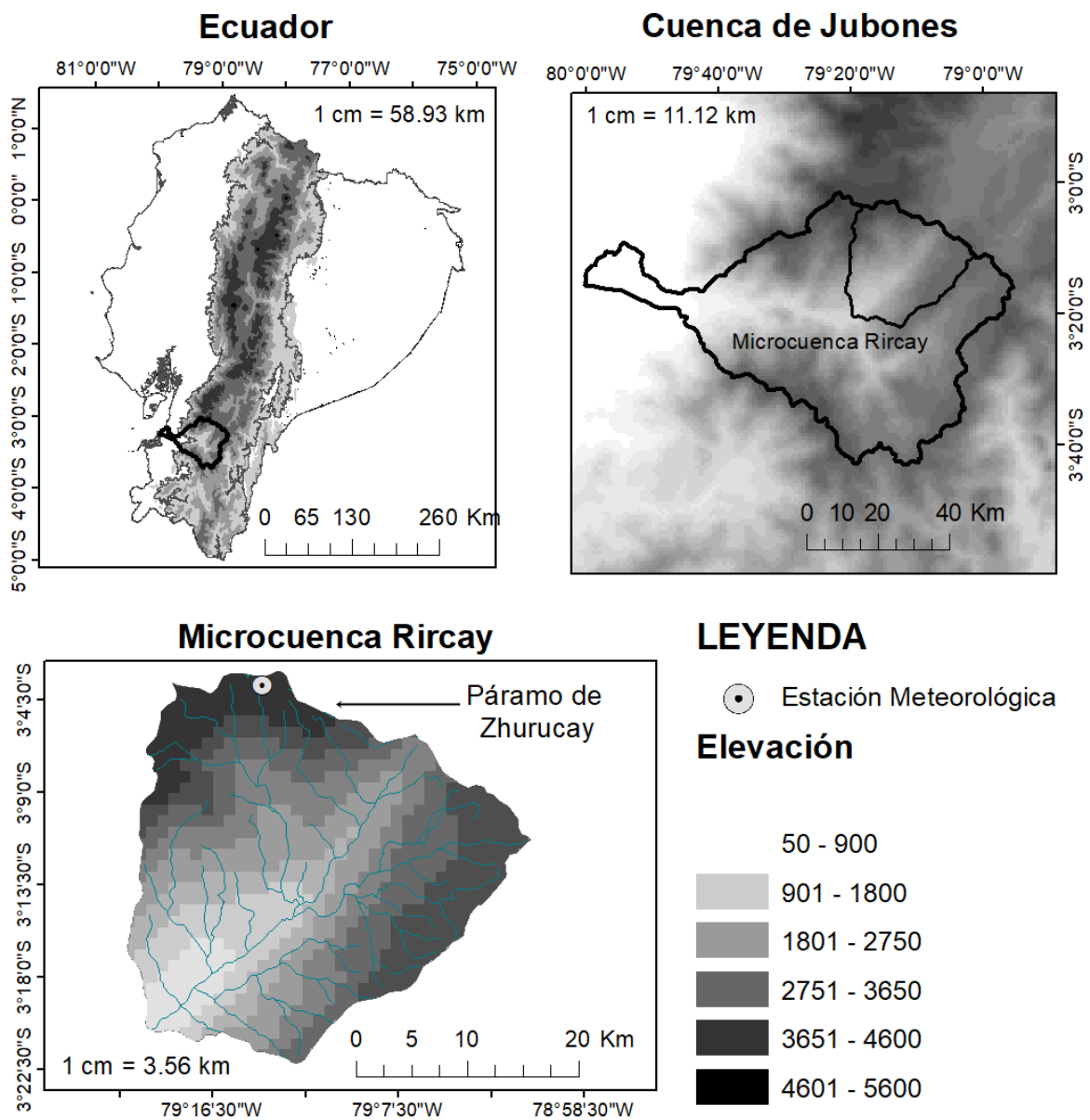
### **Objetivos específicos**

- Identificar la distribución del tamaño de gotas (DSD) para diferentes rangos de lluvia utilizando como equipo de medición el Laser Precipitation Monitor o Disdrómetro.
- Identificar la variabilidad en la relación Reflectividad (Z) – Rangos de lluvia(R) para diferentes DSD obtenidos.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El sitio de estudio se encuentra en uno de los observatorios ecohidrológicos de la Universidad de Cuenca, sobre la microcuenca del Zhurucay en el páramo de Quimsacocha. Este está ubicado al Suroeste de la República del Ecuador, en la Provincia del Azuay, aproximadamente a 85 km de la ciudad de Cuenca, sobre las jurisdicciones cantonales de Girón y San Fernando, en las parroquias San Gerardo y Chumblín. La altitud de la cuenca varía desde los 3495 a 3900 m s.n.m.



**Figura 1** Ilustración geográfica del observatorio ecohidrológico

La zona está influenciada por un clima del régimen del Pacífico desde el lado oeste de la cuenca, aunque masas de aire continentales provenientes del lado amazónico también parecen presentar influencia sobre ella. (Vuille et al., 2000). Usualmente la intensidad de la precipitación es baja (como lloviznas) pero de alta frecuencia. Sin



embargo, la precipitación a nivel espacio-temporal y en promedio anual en estos ecosistemas es muy variable, con un rango entre 700-4000 mm (Padrón R., 2013).

La temperatura media mensual es de 5.98°C, además posee un 91.44% de humedad relativa media mensual. La velocidad del viento y radiación solar se encuentran en 2.31 ( $m s^{-1}$ ) y en 13.90 ( $MJ m^{-1} dia^{-1}$ ) respectivamente (Córdova, Carrillo, Crespo, Wilcox, & Céleri, 2015). La velocidad del viento en la zona es muy fuerte y altamente variable en dirección, debido a las pendientes fuertes y la topografía accidentada (Buytaert et al., 2006).

La cobertura vegetal se compone principalmente de pajonales abarcando 78%, plantas en cojín 17%, bosque de pino 4% y bosque de Polylepys 1%. Los suelos tienen 74% de superficie natural, mientras que el pastoreo extensivo en 22% y el pastoreo intensivo en 4% de alteración. (Albuja & Tenelanda, 2014).

Los suelos del páramo son catalogados como relativamente homogéneos y se encuentran compuestos por una capa homogénea de cenizas volcánicas del cuaternario (Buytaert et al., 2006). El tipo de suelo predominante son los Andosoles e Histosoles. Según la Base Referencial Mundial para Recursos de Suelos de la FAO (WRB), estos suelos son de tipo volcánicos poco profundos, oscuros y con estructura bastante porosa, lo cual disminuye su densidad aparente y les confiere su alta capacidad de retención de agua (Buytaert et al., 2006). Según Córdova et al., 2015 los Andosoles cubren el 72% de superficie y 28% los Histosoles en la microcuenca del Zhurucay, no obstante, se ha encontrado una presencia de Leptosoles dentro de la cuenca que representan el 5% de los suelos. (Albuja & Tenelanda, 2014).

### **Análisis Estadístico**

Para el presente estudio se utilizó el programa RStudio versión 1.0.143 con se obtuvo una clasificación de lluvia por medio de la variabilidad de las gotas sobre un evento de precipitación y posteriormente se realizó una regresión no lineal para determinar parámetros a-b para cada tipo de lluvia.





**Figura 2** Observatorio ecohidrológico para la zona de Zhurucay

### **3.2. MEDICIONES DE DATOS METEOROLÓGICOS**

La base de datos fue obtenida por el Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, cuyo observatorio ecohidrológico se encuentra sobre la microcuenca del Zhurucay. Los datos corresponden a un periodo de 2 años, desde noviembre 2012 hasta agosto 2014. El equipo utilizado en este estudio fue el Laser Precipitation Monitor (Thies Clima) o disdrómetro, junto con un panel solar(c) (bp solar), un Datalogger CR 800(b) (Campbell Scientific), un regulador de voltaje(d) (SunSaber-20L) y una batería de ácido de plomo sellada(a) (Power Sonic) (figura 3). La función del disdrómetro es la medición de la precipitación y la obtención de un espectro de gotas. A continuación, se describe los componentes del sensor y el principio de su funcionamiento.

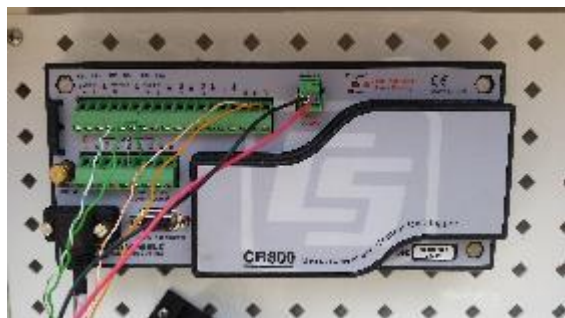
El equipo está compuesto de tres partes principales. Una caja protectora de aluminio barnizado dentro de la cual se tienen todos los circuitos electrónicos. Una cabeza emisora, la misma que está constituida por: un circuito electrónico con un diodo que emite el láser, un lente y un panel de vidrio. Una cabeza receptora con: un circuito



que posee un foto diodo que registra la señal del láser, un lente y un panel de vidrio. Tanto la cabeza emisora como la receptora son de aluminio y están unidas a través de unos brazos conectores. Las dimensiones del prisma rectangular que inscriben al disdrómetro son 53.2 x 26.6 x 16.6 cm de largo, ancho y alto respectivamente.



a



b



c



d



e

**Figura 3** Laser Precipitation Monitor ó Disdrómetro Laser Thies

La función del disdrómetro es cuantificar la precipitación a partir del momento en que una partícula (gota) cae a través del haz de luz infrarroja proveniente de la cabeza emisora (área de medición de 45.6 cm<sup>2</sup>). Una partícula al atravesar el haz, reduce la intensidad óptica medida en la cabeza receptora. Así, dependiendo de la magnitud de dicha reducción y del tiempo que dure se establece el diámetro de la partícula y la velocidad de caída. El equipo entrega una matriz o espectro de gotas representados por el número de gotas obtenidas sobre un diámetro y una velocidad específica, la matriz es de 22 x 20 clases (22 clases de diámetros y 20 clases de velocidades) total 440 clases. En la tabla 1 se presenta los rangos de diámetros y velocidades empleados por el disdrómetro, además de la amplitud que existen entre cada uno de estos rangos (class width). A partir de este espectro de gotas, el equipo es capaz de obtener parámetros integrales como reflectividad y tasa de lluvia.

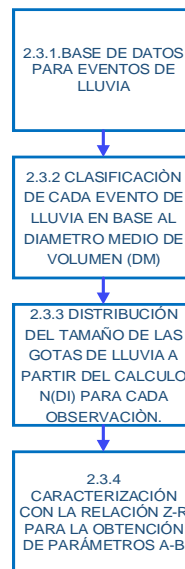
**Tabla 1** Velocidades y diámetros medibles por el disdrómetro

Particle diameter class			Particle speed class		
Class	Diameter [mm]	Class width [mm]	Class	Speed [m/s]	Class width [m/s]
1	≥ 0.125	0.125	1	≥ 0.000	0.200
2	≥ 0.250	0.125	2	≥ 0.200	0.200
3	≥ 0.375	0.125	3	≥ 0.400	0.200
4	≥ 0.500	0.250	4	≥ 0.600	0.200
5	≥ 0.750	0.250	5	≥ 0.800	0.200
6	≥ 1.000	0.250	6	≥ 1.000	0.400
7	≥ 1.250	0.250	7	≥ 1.400	0.400
8	≥ 1.500	0.250	8	≥ 1.800	0.400
9	≥ 1.750	0.250	9	≥ 2.200	0.400
10	≥ 2.000	0.500	10	≥ 2.600	0.400
11	≥ 2.500	0.500	11	≥ 3.000	0.400
12	≥ 3.000	0.500	12	≥ 3.400	0.800
13	≥ 3.500	0.500	13	≥ 4.200	0.800
14	≥ 4.000	0.500	14	≥ 5.000	0.800
15	≥ 4.500	0.500	15	≥ 5.800	0.800
16	≥ 5.000	0.500	16	≥ 6.600	0.800
17	≥ 5.500	0.500	17	≥ 7.400	0.800
18	≥ 6.000	0.500	18	≥ 8.200	0.800
19	≥ 6.500	0.500	19	≥ 9.000	1.000
20	≥ 7.000	0.500	20	≥ 10.000	10.000
21	≥ 7.500	0.500			
22	≥ 8.000	∞			

**Fuente:** Adolf Thies, 2010

### 3.3. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos planteados se siguieron ciertos pasos generales como se observa en la figura 4.



**Figura 4** Pasos generales para el análisis de datos [JO5]  
[JO6]

#### 2.3.1. Base de datos para eventos de lluvia

Se obtuvo una base de datos de precipitación para la microcuenca de Zhurucay mediante eventos de lluvia proporcionados por (Orellana, Céleri, Rollenbeck, & Bendix, 2017), cuyo periodo de medición es de 2 años, el objetivo fue caracterizar a los eventos de acuerdo a su variabilidad de gotas, comparando como un evento se diferencia de otro a partir de la variabilidad de sus tamaños de gotas a través del tiempo, permitiendo tener una idea sobre tipos de precipitación que llueven diferente. Se encontraron 710 eventos de lluvia con duración mínima de 10 minutos y una máxima de 15 horas (Anexo 1).

Se trabajó con el espectro de gotas medido por el disdrómetro, obteniendo en cada observación de 5 minutos el diámetro medio de volumen (mean volumen diameter o Dm). El objetivo fue asignar un tipo de precipitación específica (First Stratiform,



Second Stratiform, Initial Convective y Continue Convective) a cada observación de 5 minutos, según como varían sus Dm dentro de un evento de lluvia.

$$Dm = \frac{\int_0^{\infty} N(D)D^4 dD}{\int_0^{\infty} N(D)D^3 dD} \quad (1)$$

Proporcionada por Testud et al., 2001 aplicada a nuestra base de datos, donde  $N(D_i)$  es la distribución del tamaño de la gota y  $D$  es el diámetro de gotas. Para el espectro de gotas, el tercer y cuarto momento de los diámetros se calculan y  $Dm$  se determina posteriormente.

### **2.3.2. Clasificación de cada evento de lluvia en base al diámetro medio de volumen (Dm)**

Con los  $Dm$  calculados se procedió a establecer un tipo de lluvia a cada observación, analizando como varia sus  $Dm$  dentro de un evento. Los procesos fueron realizados mediante el programa R Studio[JO7] por medio del cual se generó un algoritmo de clasificación de lluvia tomando en cuenta la variación de los  $Dm$ .

Para el algoritmo de clasificación se tomó en cuenta el estudio de (Atlas et al., 1999), los cuales para realizar una variación sistemática del tamaño de la gota y las relaciones radar-precipitación, dividen a la lluvia en 4 regiones, tomando en cuenta la variación de los diámetros medios de volumen.

Como primer paso fue identificar el evento de lluvia[JO8] con el que se va a trabajar, luego se procedió a observar la variabilidad de sus  $Dm$  dentro del evento. (Atlas et al., 1999), ya determinan tipos de lluvia mediante la variación de  $Dm$ , de tal manera que contribuyen a una percepción más clara de clasificar lluvias mediante esta técnica sin embargo, a comparación de nuestro tipo de lluvia, este estudio trabaja con valores de  $Dm$  muy superiores, se observó que para nuestra base de datos solo

el 0,53% de los datos supera los 2mm de Dm, por lo que los valores para clasificar tipos de lluvia fueron adaptados a nuestra base de datos (Anexo 1).

### Pre-clasificación de lluvia (Stratiform y Convective)

La Tabla 2 muestra un esquema de la base de datos, para explicar la metodología de clasificación de gotas de lluvia, la misma que se expone en diferentes pasos:

**Tabla 2** Esquema de datos por evento de precipitación[ALEXMAC9][op10]

	Observaciones	Serie de Fechas	id	Dm	
EVENTO A	1a	19/11/2013 13:35	1	1,6	Convective
	2a	19/11/2013 13:40	1	1,0	Stratiform
	3a	19/11/2013 13:45	1	0,9	Stratiform
	4a	19/11/2013 13:50	1	0,9	Stratiform
	5a	19/11/2013 14:00	1	0,7	Stratiform
	6a	19/11/2013 14:05	1	0,6	Stratiform
	7a	19/11/2013 14:35	1	0,9	Stratiform
	8a	19/11/2013 14:55	1	1,6	Convective
	9a	19/11/2013 15:25	1	1,5	Convective
EVENTO B	1b	27/01/2014 13:00	2	0,8	Stratiform
	2b	27/01/2014 13:05	2	0,8	Stratiform
	3b	27/01/2014 13:10	2	1,0	Stratiform
	4b	27/01/2014 13:15	2	1,3	Stratiform
	5b	27/01/2014 13:20	2	1,2	Stratiform
	6b	27/01/2014 13:25	2	1,3	Stratiform
	7b	27/01/2014 13:30	2	1,8	Convective
	8b	27/01/2014 13:35	2	1,8	Convective
	9b	27/01/2014 13:40	2	1,1	Stratiform

**Fuente:** Autor, 2017

Debemos tener en cuenta que la clasificación se realizó por evento de lluvia.

**Paso 1.-** Se trabajó solo con el sesgo de datos con id igual, es decir los pertenecientes al mismo evento de lluvia y se evaluó si el inicio del evento (celda 1a) es mayor o igual a 1 mm, por lo tanto, fué denominada lluvia Convective, si la respuesta es negativa será denominada Stratiform. Esta pregunta siempre será realizada después de finalizar un evento de lluvia (Evento A) y empiece un nuevo evento (Evento B).

**Paso 2.-** Si la respuesta del primer paso fue lluvia Convective entonces se pregunta ¿si para la segunda observación o time step de 5 minutos (celda 2a); la variación de Dm es **menor o igual** 0,5 con respecto a la anterior observación (celda 1a)? Si

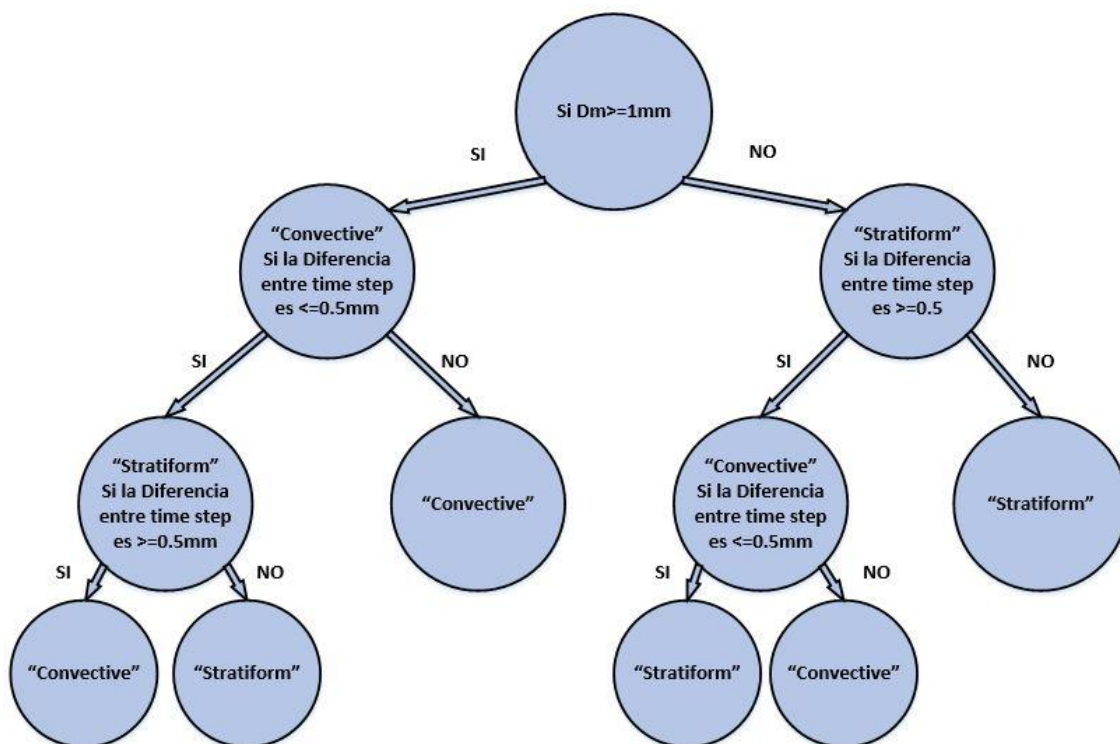


la respuesta es positiva cambia el tipo de lluvia a Stratiform, pero si es negativa se mantiene como lluvia Convective.

Sin embargo, si la respuesta del primer paso fue lluvia Stratiform entonces se pregunta ¿si para la segunda observación o time step de 5 minutos (celda 2a) la variación de Dm es **mayor o igual** 0,5 con respecto a la anterior observación (celda 1a)? si la respuesta es positiva el tipo de lluvia cambia a Convective, pero si es negativa se mantiene como lluvia Stratiform.

Finalmente se realiza los mismos pasos de clasificación cuando termina el Evento A y empieza nuevo evento como el Evento B.

A continuación, se presenta un árbol binario para categorización de lluvia Stratiform y Convective por Dm. De esta manera se representa de forma resumida la clasificación realizada.



**Figura 5** Pre-clasificación de lluvia Stratiform y Convective

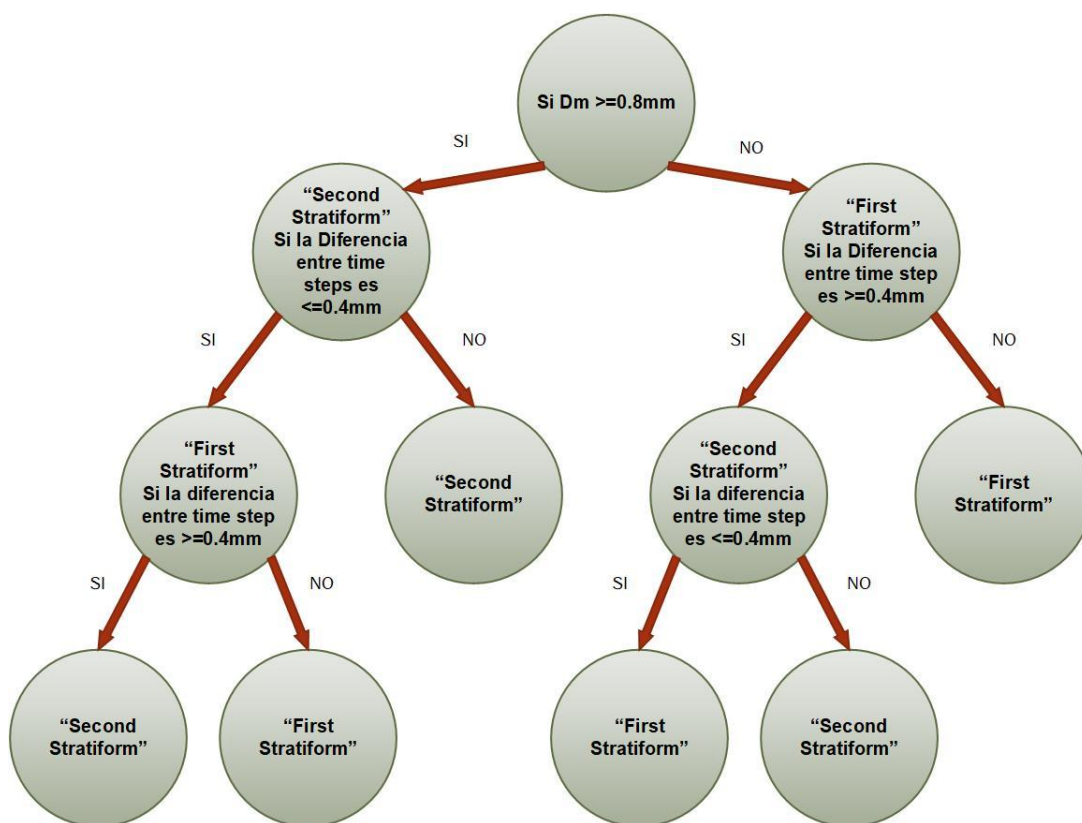
**Fuente:** Autor, 2017

De esta manera se obtuvo una pre-clasificación de la lluvia, denominada lluvia Stratiform y Convective. Con lo cual abarcamos de mejor manera los datos sin que puedan existir errores en la clasificación.

Consiguientemente se realizó una sub-clasificación para cada una de las lluvias obtenidas (Stratiform y Convective). Para realizar esta sub-clasificación se utilizó la misma metodología de la pre-clasificación.

### **Clasificación de lluvia Stratiform: First Stratiform (FS) y Second Stratiform (SS).**

Para esta sub-clasificación se trabajó únicamente con los datos obtenidos de lluvia Stratiform. Como se explicó anteriormente, el criterio de clasificación fue el mismo, lo que varían son los valores de clasificación para ser definidos como First Stratiform (FS) o Second Stratiform (SS).

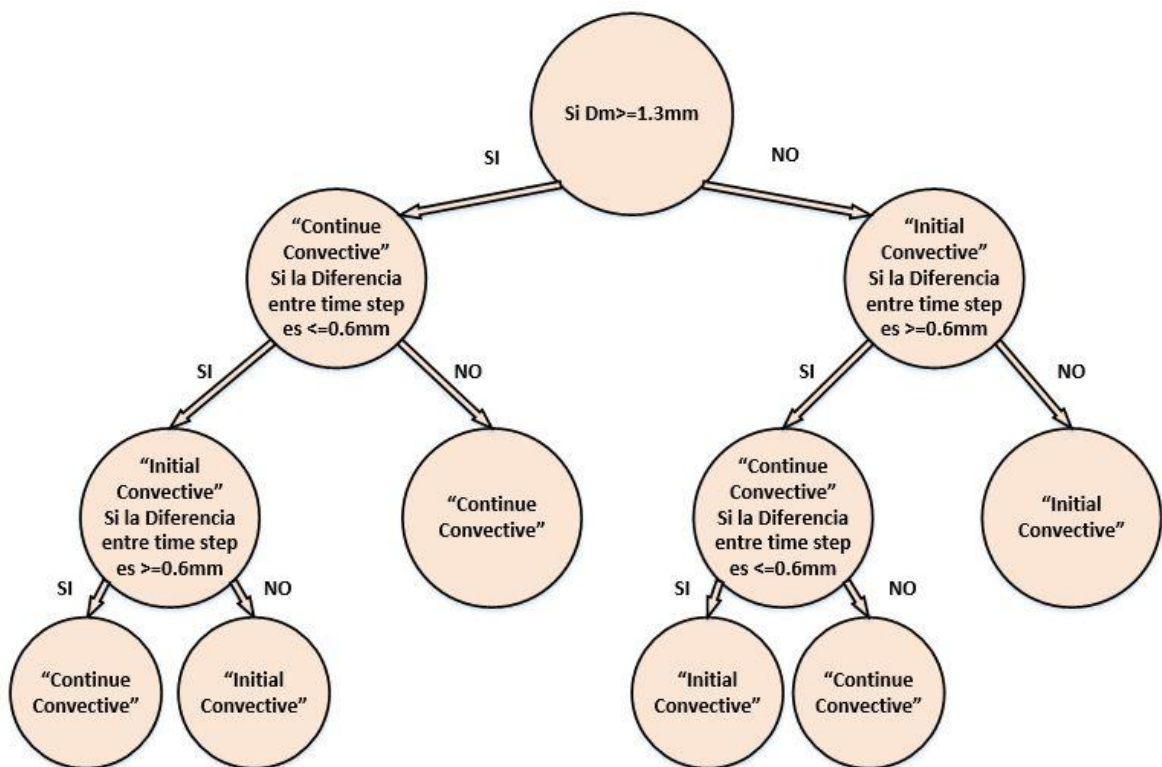


**Figura 6** Sub-clasificación de Lluvias First Stratiform (FS) y Second Stratiform (SS).

**Fuente:** Autor, 2017

## Clasificación lluvia Convective: Initial Convective (IC) y Continue Convective (CC)

Así mismo para sub-clasificar estos tipos de lluvia se trabajó únicamente con datos de lluvia Convective. De igual manera el criterio de clasificación es el mismo, lo que varían son los valores de clasificación para ser definidos como Initial Convective (IC) y Continue Convective (CC).



**Figura 7** Sub-clasificación de Lluvias Initial Convective (IC) y Continue Convective (CC).

**Fuente:** Autor, 2017

De esta manera se pudo obtener 4 tipos de lluvia FS, SS, IC Y CC que se establecían a nuestros datos de precipitación.

Para tener confianza de la clasificación obtenida se procedió a realizar 3 pruebas adicionales cambiando los valores de inicio y variación de gotas.



**Tabla 3** Pruebas de valores para clasificación de tipo de lluvia

PRIMERA PRUEBA	SEGUNDA PRUEBA	TERCERA PRUEBA	CUARTA PRUEBA
Inicio evento $\geq 0,8$	Inicio evento $\geq 1$	Inicio evento $\geq 1,3$	Inicio evento $\geq 1,7$
Dm varia 0,3	Dm varia 0,5	Dm varia 0,8	Dm varia 1,2

**Fuente:** Autor, 2017

Con cada una de las 3 pruebas realizada se observó que en algunos casos, como el primer intento el número de lluvias Convective obtenidas eran demasiados a comparación de la Stratiform, resultados que son incongruentes a nuestra realidad (Padrón, 2013), mientras que la tercera y cuarta prueba mostraron que el número de lluvia Convective casi no existían por incluir valores muy altos de Dm.

Por tal motivo se estableció que la segunda prueba fué la que se adaptó de mejor manera en términos de clasificación de lluvia, a nuestra microfísica de gotas.

Con el fin de cumplir con el primer objetivo planteado se procedió al cálculo de la distribución del tamaño de gotas (DSD) mediante los valores  $N(D_i)$  y Dm para cada observación de 5 minutos, de esta manera se observa el comportamiento de la lluvia a un nivel específico.

### **2.3.3. Distribución del tamaño de las gotas de lluvia a partir del cálculo $N(D_i)$ para cada observación.**

Para la obtención del DSD, se procedió a trabajar con el espectro de gotas que consta de valores  $(n_{ij})$  en cada observación de 5 minutos (Anexo 1), el cual representa el número de gotas que pueden encontrarse sobre un diámetro y una velocidad medibles por el disdrómetro (Tabla 1).

El espectro de gotas  $(n_{ij})$  son valores crudos que no representa a nivel volumétrico una tasa porcentual, estos fueron derivados con el fin de obtener valores de  $N(D_i)$ , los cuales representan el número de gotas sobre un volumen específico, obteniendo de esta manera una matriz denominada distribución de gotas de lluvia o DSD (Drop Size Distribution).

### Distribución del tamaño de las gotas de lluvia a partir del cálculo $N(D_i)$

El número de concentración de gotas de lluvia por unidad de volumen, por unidad de tamaño en un intervalo de tiempo discreto fué calculado usando la siguiente ecuación:

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{20} \frac{n_{ij}}{A \Delta t V_j \Delta D_i}$$

donde  $N(D_i)$  es la distribución de tamaño de gota en el tamaño de la clase  $i$  ( $mm^{-3}mm^{-1}$ ),  $D_i$  es el diámetro medio de la clase  $i$  (mm),  $\Delta D_i$  es la anchura del tamaño de la clase  $i$  (mm), es decir la diferencia entre el valor medio de cada clase (tabla 1),  $n_{ij}$  es el número de gotas dentro del tamaño de la clase  $i$  y la velocidad de la clase  $j$ ,  $A$  es el área de medición del haz de luz ( $m^2$ ),  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo en segundos, y  $V_j$  es la velocidad de caída de la clase  $j$  ( $m s^{-1}$ ) (Beard, 1975). De esta manera se obtuvieron valores de  $N(D_i)$  para cada una de las 22 clases de diámetro de gotas y para cada observación de 5 minutos.

Finalmente, con los valores de  $N(D_i)$  ya calculados se procedió a clasificar y promediar los valores por tipos de lluvia (FS, SS, IC, y CC) y por meses del año, con el fin de observar las diferencias de los tipos de lluvia obtenidos y estos a su vez presentados a una escala temporal. De esta manera identificamos la distribución del tamaño de gotas (DSD) para diferentes tipos de lluvia.

#### 2.3.4. Caracterización con la relación Z-R para obtener parámetros a-b.

Para cumplir el segundo objetivo fue necesario todo el set de datos de los tipos de lluvia obtenidos en la clasificación, para de esta manera caracterizar a cada tipo de lluvia su relación Z-R (Reflectividad – Rango de lluvia).

La caracterización Z-R a cada tipo de lluvia se realizó mediante los valores de las constantes  $a$  y  $b$  que se obtuvieron a partir de una regresión potencial.



Las relaciones Z-R son necesarias para poder interpretar la variabilidad de los parámetros a-b a un nivel microfísico, con el objetivo de observar si los tipos de lluvia obtenidos son diferentes entre sí.

De esta manera se entregaron valores de las constantes para cada tipo de lluvia y no valores generales para todo el set de datos siendo estos una mezcla de todos los tipos de lluvia.

Las constantes a-b fueron obtenidas por medio de la siguiente ecuación:

$$Z = aR^b \quad (3)$$

Donde:

Z=Reflectividad

R=Intensidad de lluvia

a y b = constantes empíricas

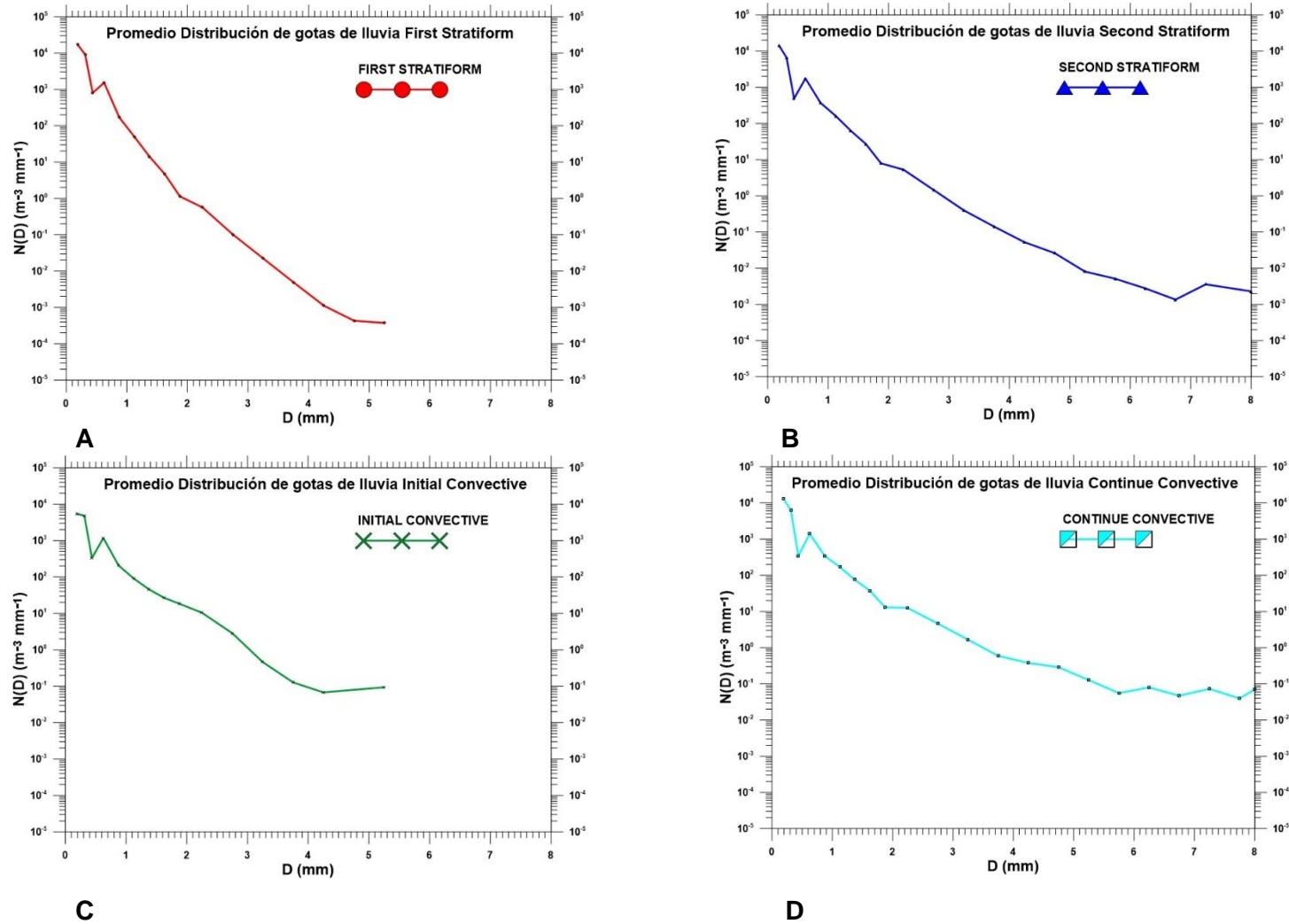
Se realizó una lectura separada de los tipos de lluvia (IS, SS, IC Y CC). Posteriormente se separaron por eventos de lluvia, por lo que la regresión no lineal (ley de potencias) se realizó únicamente considerando valores de un tipo de lluvia específica de un mismo evento.

Finalmente, con valores en las constantes a-b obtenidas se clasificó por los 4 tipos de lluvia (FS, SS, IC Y CC) y fué ilustrada a escala mensual. Para ellos fueron separados todos los eventos con sus constantes a-b por meses del año, para posteriormente ser separados por tipos de lluvia. Finalmente se obtuvo un promedio de cada constante para cada tipo de lluvia y para cada mes del año.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE GOTAS POR TIPO DE LLUVIA

Todo el set de datos de 2 años fue reunido en un solo periodo anual con el fin de presentar de manera clara las ilustraciones.



**Figura 8.** Distribución de tamaño de gotas para los tipos de lluvia: (A) first stratiform, (B) second stratiform, (C) initial convective y (D) continue convective.

La figura 9 muestra la distribución de tamaño de gotas (tendencia) de cada tipo de lluvia para todo el periodo de estudio. Se puede observar que el comportamiento de cada tipo está relacionado por la cantidad de gotas de lluvia que se encuentran sobre diámetro y volumen específico de gotas. Por medio de la clasificación de tipo de lluvia[JO11][op12] de gotas de lluvia explicada en la metodología se puede observar que:

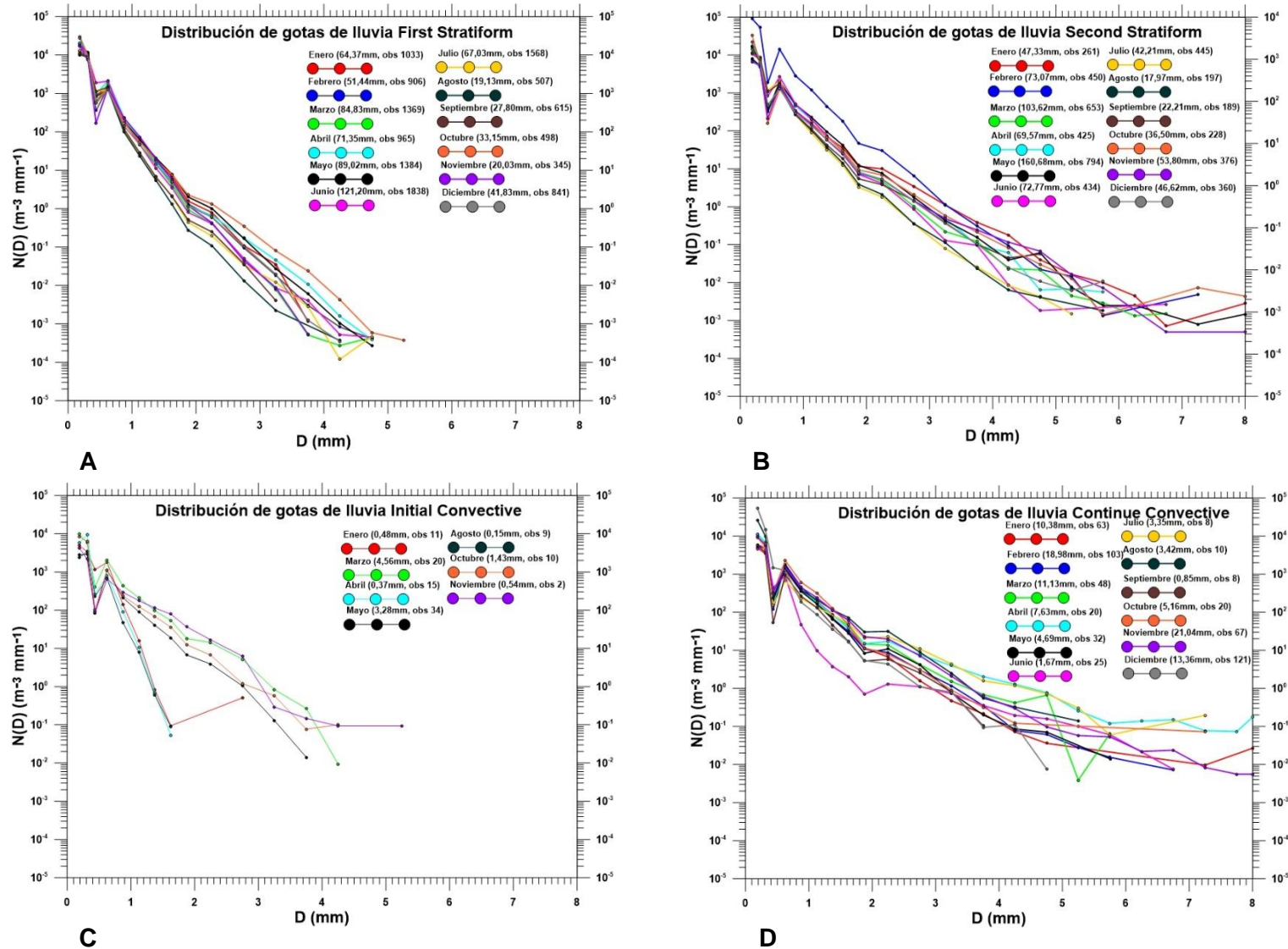
1. La figura 9A[JO13] definida como First Stratiform (FS) mantiene una tendencia con poca cantidad de gotas de diámetros mayores a 5mm (lluvia ligera), el máximo diámetro observado fue de 5,25 mm, a diferencia del tipo de lluvia en la figura 9B Second Stratiform (SS), la cual se observa una gran cantidad de gotas de lluvia con diámetros muy superiores ( $D_m > 6$  mm), el máximo diámetro encontrado fue 8 mm, siendo una lluvia más densa que FS.  
A pesar de desarrollar relaciones entre sí en su clasificación (lluvias Stratiform), ambas muestran patrones diferentes en su forma de llover.
2. La figura 9D establecida como Continue Convective (CC) muestra la estructura de una lluvia mucho más densa a los demás tipos, el gran número de concentración de gotas con diámetros superiores ( $D_m > 6$  mm) confirma y lo categoriza como una lluvia realmente fuerte, incluso mayor al tipo SS (Figura 9B), la cual muestra diámetros similares, pero con menor número de gotas con diámetros superiores que el tipo CC (Figura 9D).
3. Para la Figura 9C denominada Initial Convective (IC) se pudo observar un tipo de lluvia con diámetros y número de gotas menores, sin embargo, esto no corresponde a que este tipo de lluvia tiene esta forma específica (DSD), esto es debido a que los valores o datos encontrados para este tipo de lluvia son muy escasos debido a diferentes factores: (i) Existen casos donde la distribución de gotas en cada tipo de lluvia no tiene una marcada diferencia y puede llevar a una clasificación errónea, particularmente para los tipos second stratiform e initial convective (ii) El tipo de lluvia IC puede ser una mezcla de gotas pertenecientes a las lluvias SS o CC, debido a que en ambos tipos se observan



formas definidas de llover, mientras que IC no presenta una tendencia específica y su cantidad de valores obtenidos en la clasificación es muy escasa.

Observando las diferencias que existen entre tipos de lluvia mostrado en las figuras anteriores, es necesario a continuación ilustrar un conjunto de gráficas, donde se pueda observar a detalle la distribución de cada tipo a escala anual, con el fin de examinar a un nivel más específico el desarrollo y la estructura de cada una.

#### 4.2. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GOTAS POR TIPO DE LLUVIA A ESCALA ANUAL.



**Figura 9.** Distribución de tamaño de gotas para los tipos de lluvia: (A) first stratiform, (B) second stratiform, (C) initial convective y (D) continue convective a escala mensual.



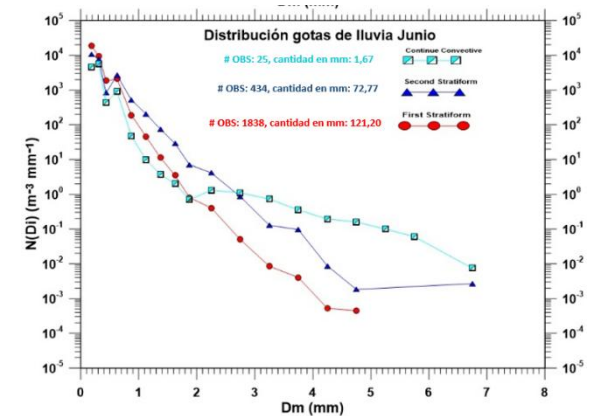
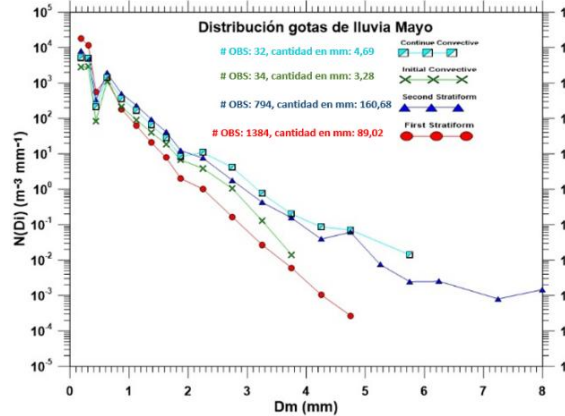
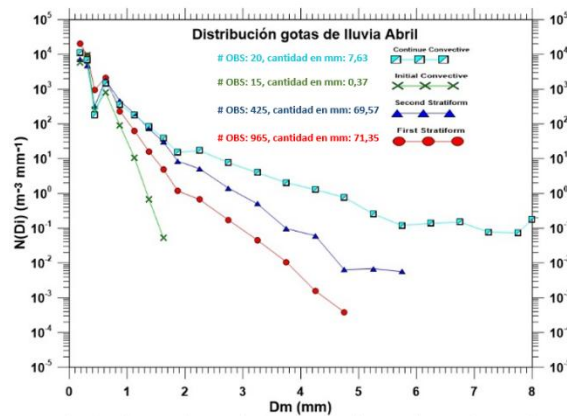
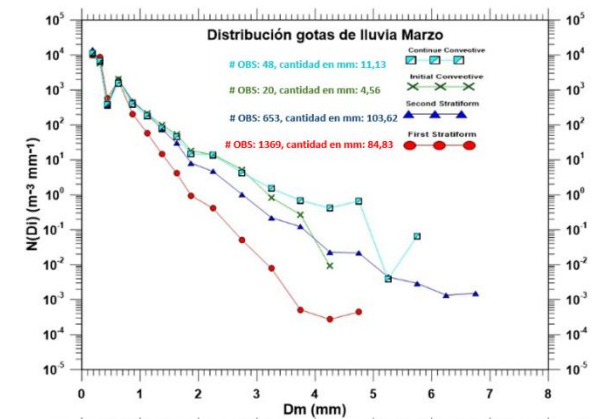
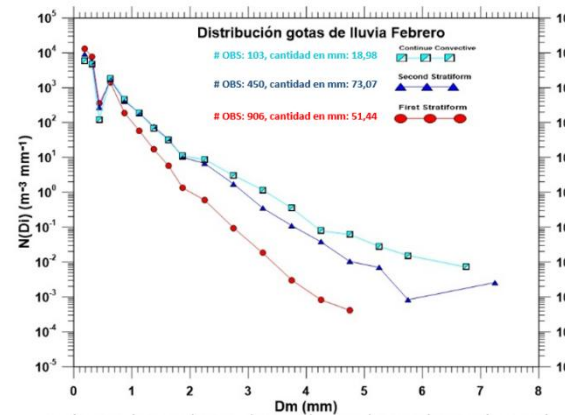
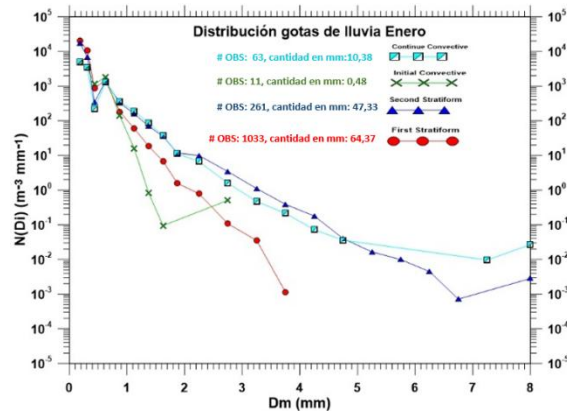
El conjunto de figuras muestra la influencia que tiene los tipos de lluvia sobre cada mes del año, de esta manera podemos conocer y cuantificar qué tipos de lluvias generan mayor incidencia sobre ciertos meses y su influencia en términos de meteorología en la zona. Para la Figura 10A se observa que el tipo de lluvia FS tiene mayor incidencia para los meses de octubre y abril mientras que el mes de agosto FS es de menor aporte, con un bajo número de gotas de lluvia.

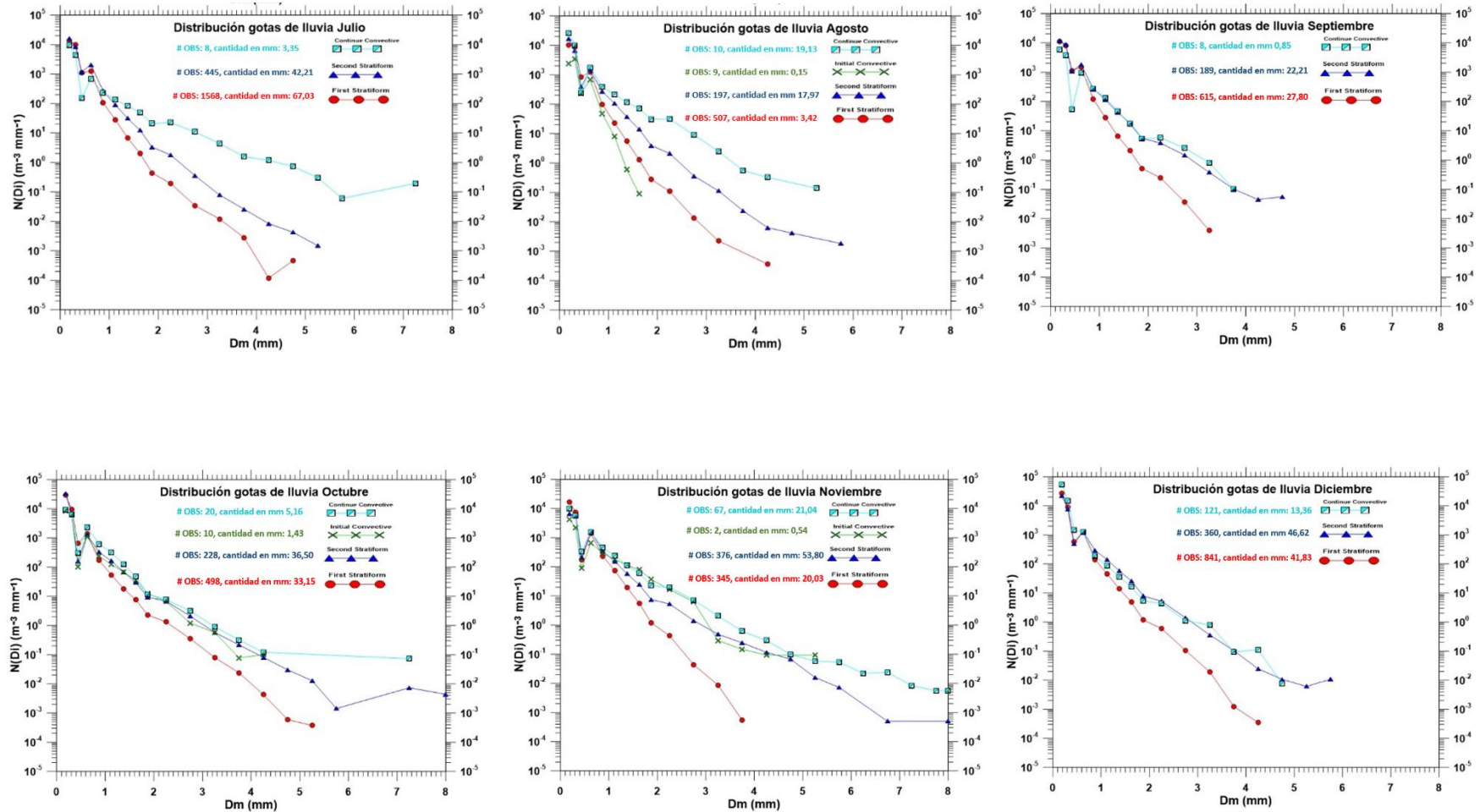
Las Figuras 10B y 10D son necesarias describirlas conjuntamente debido a que se observa una misma tendencia en su forma de llover. Sin embargo, podemos observar que el tipo de lluvia SS tiene mayor manifestación en meses como febrero y octubre mientras que, meses como julio o agosto su influencia es mínima. Para CC los meses de abril y julio muestran mayor presentación de este tipo de lluvia, sin embargo, diciembre y junio es menor su manifestación.

Para figura 10C es difícil observar una tendencia a lo largo de cada mes debido a que el número de datos encontrados es insuficiente para poder dar respuesta a su forma de llover y esto se observa con la inexistencia de datos en algunos meses como febrero junio, julio[ALEXMAC14][op15], etc.



### 4.3. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GOTAS DE LLUVIA POR TIPO DE LLUVIA A ESCALA MENSUAL





**Figura 10.** Conjunto de ilustraciones para distribuciones de tipos [JO16] de lluvia por meses del año.



El conjunto de figuras muestra como varía la distribución de los distintos tipos de lluvia de forma detallada a través de los meses del año. Es importante observar meses como abril, julio y agosto, donde es clara la distribución de gotas que existe entre cada tipo, cada una revela una forma específica en la densidad de gotas. Estos meses muestran que la lluvia no es solo un conjunto de gotas que cae aleatoriamente, sino más bien los procesos de formación de gotas pueden ser específicos para ciertos meses, como es el caso del mes de abril, donde las tendencias de cada tipo son independientes entre sí y es evidente observar que para este mes en específico los procesos microfísicos son particulares para cada tipo de lluvia.

Como se indicó anteriormente las diferencias entre tipos de lluvia son claras en ciertos meses del año, sin embargo, no es tan evidente para meses como noviembre y diciembre, donde las distribuciones de gotas son similares entre CC y SS. Estos dos meses muestran similitud en su forma de llover lo que produce que sus distribuciones se superpongan. Esto es debido a que estos meses no son considerados lluviosos y su aporte en número de gotas es menor con respecto a otros, a pesar de que SS tiene mucha contribución en milímetros que CC (Noviembre SS: 53,80mm y CC: 21,04mm).

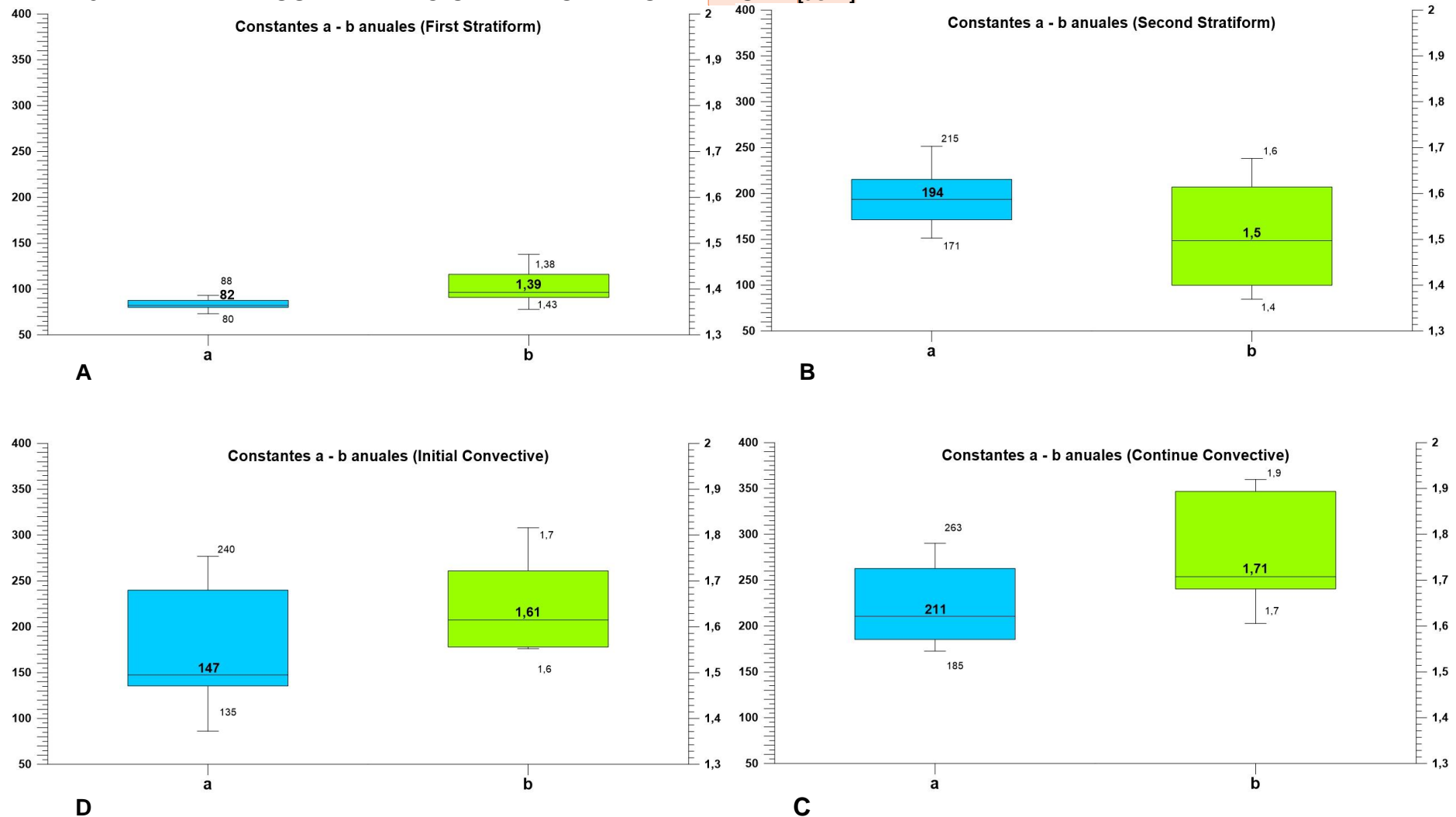
La contribución de CC pasa desapercibida, debido a una menor incidencia, sus eventos de lluvia no llegan a ser tan marcados en términos de concentración de gotas como en abril o mayo considerados meses lluviosos. De igual manera se observa que en el mes diciembre los diámetros no exceden los 5 mm, mientras que SS tiene diámetros más grandes, esto probablemente es debido a la formación de nubes o por condiciones climáticas en este período del año lo que produce que los tipos de lluvia durante este periodo se superpongan y no pueda ser clara su distribución.

Por otro lado, IC no entrega información en varios meses, esto es debido a una ausencia de eventos de lluvia por falta de datos, producto de una combinación de tipos en su clasificación.



Asimismo, se pueden analizar patrones similares de un tipo de lluvia específico para diferentes meses del año, como es el caso del tipo CC en meses como abril y agosto. En abril se observan gotas con  $D > 5$  mm mientras que en agosto los  $D < 5,5$  mm, para este caso se tiene lluvia CC en ambos meses con tendencia similares, sin embargo, el mes de agosto no contiene gotas tan grandes como las de abril, que podrían tener un impacto erosivo en los suelos. A pesar de ser ambos tipos de lluvia CC el desarrollo de formación de lluvia del mes de agosto no tendría procesos de formación de gotas con dimensiones grandes. Lo que demuestra una clara diferencia en la distribución de tamaño de gotas, siendo incluso de igual tipo.

### 3.4. PARAMETROS DE RELACION Z-R POR TIPO DE LLUVIA[Jo17]



**Figura 11.** Conjunto de parámetros de relación Z-R por tipo de lluvia: (A) first stratiform, (B) second stratiform, (C) initial convective y (D) continue convective.



En las secciones anteriores ha sido posible identificar la distribución de tamaño de gotas de cada tipo de lluvia. Sin embargo, los detalles que se encuentran en esta caracterización se pueden sintetizar a través de la identificación de las relaciones Z-R.

A partir de las observaciones que corresponden a los distintos tipos de lluvia en cada evento se determinaron las constantes  $a$ -  $b$  y sus valores representativos para cada tipo de lluvia.

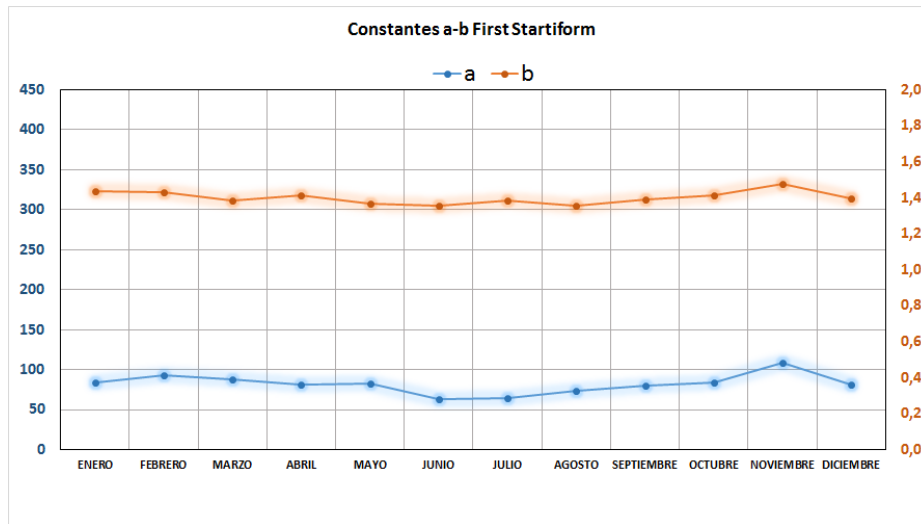
Las relaciones Z-R condensan en una sola ecuación lo que estamos viendo a mayor detalle con la distribución de gotas. De manera que, para saber la forma o tendencia de llover entre tipos de lluvia son necesarios los valores en las constantes los cuales entregan de una manera más estandarizada la diferencias entre cada una.

Efectivamente como se muestra en la figura 12A, el tipo FS muestra coeficientes bajos a diferencia de los otros tipos de lluvia, esto es debido a que la distribución de gotas son diferentes como se observó en el grupo de gráficas anteriormente, esto se justifica debido a que, existen menores valores de reflectividad y de tasas de lluvia que los demás tipos, por tal motivo requieren valores menores para ajustarse de mejor manera a la ecuación.

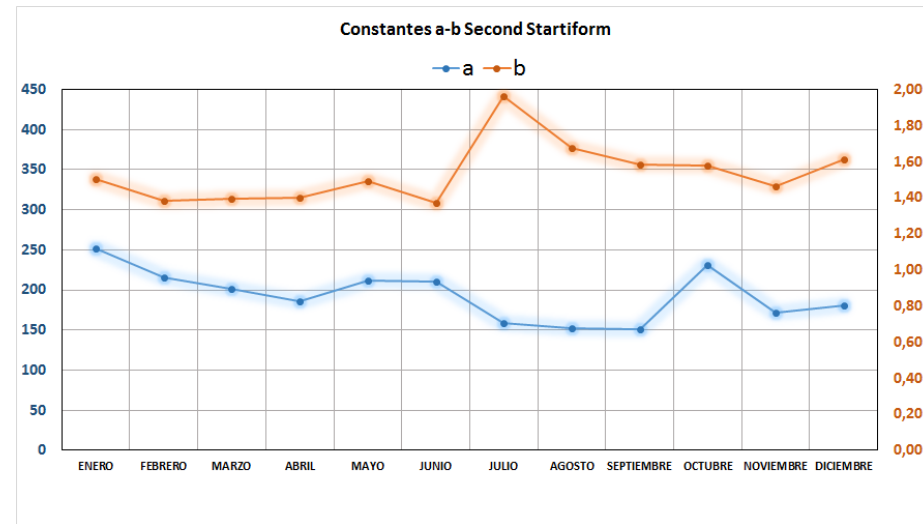
No es el caso de CC (Figura 12C) cuyos valores de las constantes son superiores, debido a que este tipo de lluvia es densa con altos valores de Z y R que requieren adaptarse a una regresión no lineal.

Con ello se afirma que los valores de las constantes crean una percepción de distintas formas de llover sobre una zona y la diferencia que existe entre cada una de ellas son aún mayores.

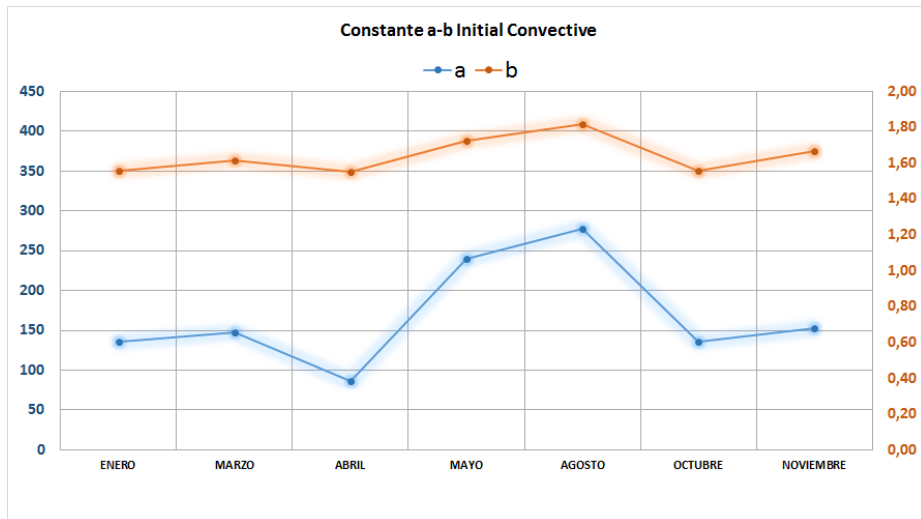
### 3.5. PARAMETROS DE LA RELACION Z-R A NIVEL MENSUAL Y POR TIPO DE LLUVIA



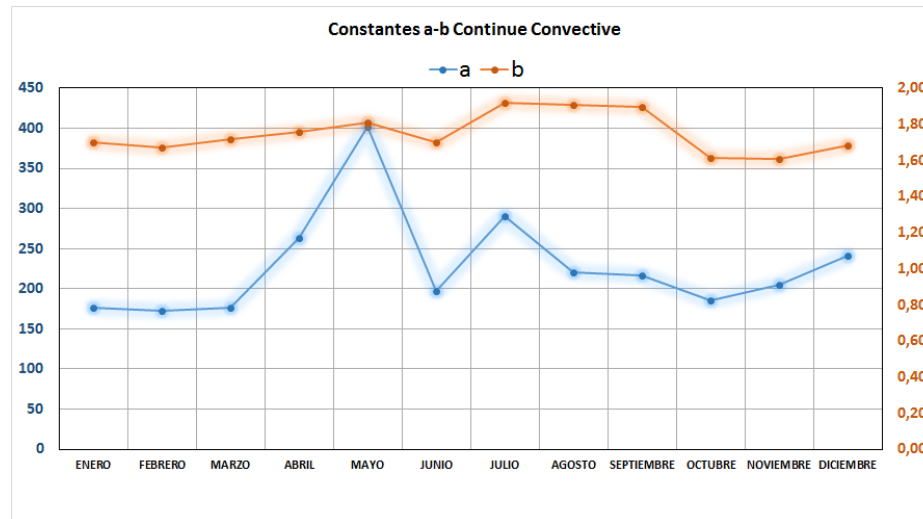
A



B



C



D

**Figura 12.** Conjunto de parámetros de relación Z-R por tipo de lluvia: (A) first stratiform, (B) second stratiform, (C) initial convective y (D) continue convective a escala mensual.



Los distintos tipos de lluvia que existen con su determinado valor de las constantes varían a nivel mensual en algunos casos, sin embargo, FS (Figura 13A) se mantiene constante durante todo el año, estos valores no muestran cambios bruscos o variaciones amplias para ajustarse a la ecuación, debido a que por tratarse de una lluvia ligera sin cambios repentinos en los valores de reflectividad e intensidad esto genera estabilidad en sus constantes, observando valores semejantes a lo que se obtuvo en la figura 12A.

Mientras que tipo de lluvia SS (Figura 13B) y CC (Figura 13D) muestran variaciones en sus valores debido a que deben ser adaptadas a la ecuación en ciertos meses (mayo, junio y Julio), donde los valores de la reflectividad y la tasa de lluvia incrementan y disminuyen abruptamente.

La derivación de R en función de Z encuentra parámetros a y b, estos son ajustados con respecto al valor de reflectividad y tasa de lluvia. Un cierto valor de reflectividad puede estar asociado a distintas distribuciones de gotas de lluvia, esto se cumple debido a que si observamos el mes de noviembre o diciembre (figura 11), cuyos tipos de lluvia (SS y CC) se sobreponen entre sí, definiéndolas como semejantes, sin embargo, esto no está definido como tal debido a que, si existen diferencias entre cada una, por medio del cálculo de la relación Z-R y observado en la gráfica figura 13B y 13D, donde los valores de a y b para estos meses son diferentes (Noviembre tipo SS; constante  $a = 160$  y  $b = 1,55$ ; tipo CC  $a = 210$  y  $b = 1,65$ ), (Diciembre tipo SS; constante  $a = 180$  y  $b = 1,60$ ; tipo CC  $a = 240$  y  $b = 1,70$ ). Los coeficientes ayudan a dar constancia de la diferencia que existe entre tipos de lluvia y que a pesar de que se observó en la figura 11 sobreposición de tipos de lluvia, con las constantes de la relación Z-R se refleja la diferencia que existe entre cada una. Esto es debido a que a un nivel microfísico ocurren procesos en la forma de llover permitiendo que los parámetros varíen para ajustarse a la ecuación.

Finalmente se observa que IC tiene una variabilidad muy marcada y con ausencia de meses, esto es debido a pocas observaciones obtenidas en la clasificación de gotas que permitieron una regresión incierta, no obteniendo una relación precisa y tampoco un ajuste a una realidad más generalizada por falta de datos.



## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La distribución de gotas (DSD) en eventos de precipitación es indispensables para conocer el comportamiento de la lluvia a nivel microfísico. Este estudio reveló que existen diferencias en la DSD de diversos tipos de lluvia sobre el páramo de Zhurucay, esta es la primera contribución de este tipo a nivel temporal(mensual) en ecosistemas de alta montaña.

El estudio contribuye a generar una clasificación de lluvia, que es indispensable para futuros análisis. Además, el análisis intra-evento de la distribución de lluvia por tipos mediante su variabilidad de  $D_m$  y cómo se comporta por cada mes, los cuales son factores necesarios para conocer el comportamiento de la lluvia de manera apropiada.

Realizando la clasificación de lluvia a partir de la variabilidad de  $D_m$  a nivel intra-evento, se pudo conocer que cada tipo de lluvia obtenida revela una distribución propia.

El estudio permitió caracterizar el periodo, la cantidad y el tipo de lluvia que se manifiesta sobre ecosistemas de alta montaña, como el páramo de Zhurucay.

Se pudo conocer que meses como abril y julio generaran tipos de lluvia intensas con abundante número de gotas con diámetros superiores 6 mm, lo que contribuye a tener una idea del impacto a nivel de erosividad en importantes ecosistemas como el páramo de Zhurucay. Mientras que lo contrario ocurre en el mes de septiembre.

El análisis contribuyo a aclarar los procesos microfísicos de la lluvia sobre ecosistemas de alta montaña, para posteriormente llegar a contribuir en estudios de erosividad, deslaves o conservación.

Con los valores de las constantes se logró obtener estimaciones específicas de los parámetros  $a$  y  $b$  de la relación  $Z-R$  para cada tipo de lluvia adaptados a nuestro sitio. De esta forma se puede dar referencia numérica de como llueve la zona del páramo



andino y a su vez ser comparada con otros ecosistemas o incluso con diferentes ecosistemas de alta montaña.

A su vez se pudo conocer que el tipo de lluvia inicial convectiva no genera una distribución delimitada, esto se debe a que nuestra zona de estudio está influenciada por procesos transitorios de lluvia generando que no se mantengan tipos de lluvia puros durante el evento.

## **Trabajos futuro**

Se han identificado las siguientes actividades que pueden servir para futuras investigaciones.

1. Analizar la distribución de gotas con la misma metodología de clasificación de lluvia, para zonas con ecosistemas similares, con el fin de observar si existe diferencia a un nivel geográfico.
2. Realizar un análisis a escala estacional con el fin de observar la forma de las distribuciones de la lluvia en periodos húmedos y secos.
3. La metodología del estudio puede ser utilizada para el análisis de un set de datos de mayor periodo o etapas como el fenómeno de niño y niña, para conocer, comparar y descubrir el comportamiento de la lluvia en épocas particulares.

## **5. BIBLIOGRAFÍA**

Adolf Thies, G. (2010). Manual Laser Precipitation Monitor, 1–52.

Albuja, C., & Tenelanda, D. (2014). DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL DE LLUVIA-ESCORRENTÍA PARA INTERPRETACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA ALTOANDINA DEL RÍO ZHURUCAY.

Atlas, D., Ulbrich, C., Marks, F., Amitai, E., & Williams, C. (1999). Systematic



- variation of drop size and radar-rainfall relations. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 104(27), 6155–6169. <https://doi.org/10.1029/1998JD200098>
- Beard, V. (1975). Terminal Velocity and Shape of Cloud and Precipitation Drops Aloft. Retrieved from <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469%281976%29033%3C0851%3ATVASOC%3E2.0.CO%3B2>
- Becker, A., & Bugmann, H. (1999). Global Terrestrial Observing System Global Change and Mountain Regions The Mountain Research Initiative EDITED BY. Retrieved from <http://www.fao.org/gtos/gtospub/pub28.htm>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006). HIDROLOGÍA DEL PÁRAMO ANDINO: PROPIEDADES, IMPORTANCIA Y VULNERABILIDAD.
- Campozano, L., Célleri, R., Trachte, K., Bendix, J., Samaniego, E., & Samaniego, E. (2016). Rainfall and Cloud Dynamics in the Andes: A Southern Ecuador Case Study. *Advances in Meteorology*, 2016, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2016/3192765>
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316–3327. <https://doi.org/10.1002/hyp.6575>
- Checa, R. (2011). First measurement of the small-scale spatial variability of the rain drop size distribution, 239.
- Córdova, M., Carrillo, G., & Célleri, R. (2013). ERRORES EN LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA DE UNA ZONA DE PÁRAMO ANDINO DEBIDOS AL USO DE DATOS MENSUALES, DIARIOS Y HORARIOS ERRORS, 5, 1–2.
- Córdova, M., Carrillo, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Célleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230–239. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-0024.1>
- Jaffrain, J. L., & Berne, A. (2012). Quantification of the Small-Scale Spatial Structure of the Raindrop Size Distribution from a Network of Disdrometers. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0136.1>
- Jameson, A. R., Larsen, M. L., & Kostinski, A. B. (2015). Disdrometer Network Observations of Finescale Spatial–Temporal Clustering in Rain. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0136.1>
- Maki, M., Keenan, T. D., Sasaki, Y., Nakamura, K., Maki, M., Keenan, T. D., ... Nakamura, K. (2001). Characteristics of the Raindrop Size Distribution in Tropical Continental Squall Lines Observed in Darwin, Australia. *Journal of Applied Meteorology*, 40(8), 1393–1412. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1393:COTRSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1393:COTRSD>2.0.CO;2)



Mena Vásconez, P., & Hofstede, R. (2010). Los páramos ecuatorianos. Retrieved from [http://beisa.dk/Publications/BEISA Book pdfer/Capitulo 06.pdf](http://beisa.dk/Publications/BEISA%20Book%20pdfer/Capitulo%2006.pdf)

Ministerio del Ambiente. (2012). Sistema de clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental.

Orellana, J., Céleri, R., Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2017). Analysis of rain types and their Z-R relationships at different locations in the high Andes of southern Ecuador. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, JAMC-D-17-0009.1. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0009.1>

Padrón, R. (2013). Analisis de la Estructura de la LLuvia del Paramo.

Pauta, P., & Céleri, R. (2015). CUANTIFICACIÓN DE LOS ERRORES AL ESTIMAR LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN EN EL PÁRAMO Y LA CIUDAD, OCASIONADOS POR LA TECNOLOGÍA DE MONITOREO Y EL MÉTODO DE CÁLCULO.

Testud, J., Sté, A., Oury, P., Black, R. A., Amayenc, P., & Dou, X. (2001). The Concept of Normalized” Distribution to Describe Raindrop Spectra: A Tool for Cloud Physics and Cloud Remote Sensing. Retrieved from <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%282001%29040%3C1118%3ATCONDT%3E2.0.CO%3B2>

Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D10), 12447–12460. <https://doi.org/10.1029/2000JD900134>





## Anexos

### Anexo 1

1	X	Date_Serie	Rainrate	Dm	id	Z	NDI_1	NDI_2	NDI_3	NDI_4	NDI_5	NDI_6	NDI_7	NDI_8	NDI_9	NDI_10	NDI_11	NDI_12	NDI_13
2		108008 19/11/2013 13:35	1,98908338	1,59438261		1	1294,82049	4480,22359	3172,78749	39,1219101	455,720814	192,57627	155,669942	97,6774138	57,0253399	19,1671257	17,2253011	2,66577964	0
3		108009 19/11/2013 13:40	0,89518843	1,03419763		1	163,220758	2810,16923	2289,50313	18,8030961	620,69201	281,849883	158,174823	55,3871111	13,4128236	2,68272658	0	0	0
4		108010 19/11/2013 13:45	0,42310613	0,8528885		1	49,5019493	718,565027	581,376748	25,8081711	789,291082	209,842084	56,1023449	15,0777771	1,70446065	0	0	0	0
5		108011 19/11/2013 13:50	0,30464368	0,91341764		1	50,9803413	575,639258	660,233878	10,9377487	478,320749	108,293835	57,6711703	6,6255886	0	0	0,62076797	0	0
6		108013 19/11/2013 14:00	0,25374267	0,65650673		1	16,7713799	828,20001	1545,43074	15,9764868	1204,15132	102,298369	2,43654783	1,21827391	0	0	0	0	0
7		108014 19/11/2013 14:05	0,1221801	0,64080109		1	8,02567172	682,916978	1012,08879	5,89901053	630,825438	31,1415544	5,38605309	0	0	0	0	0	0
8		51339 06/05/2013 19:10	0,87250645	0,78877906		2	92,350253	2358,50868	2283,72117	84,1837961	2334,20954	363,968428	88,3417504	28,9765795	2,50504065	0	0	0	0
9		51340 06/05/2013 19:15	0,97247067	0,80874379		2	145,758222	1275,67975	2465,09701	104,953229	2720,59701	353,958464	80,9869857	22,5693612	1,80776129	1,61528658	0,32581744	0,32581744	0
10		51341 06/05/2013 19:20	0,43661947	1,0261153		2	123,691043	2807,83421	3116,25765	21,8754974	470,778176	92,4518209	50,8516556	15,0777771	7,82502387	2,94406839	0,40029	0,29495053	0
11		51342 06/05/2013 19:25	0,89038452	1,30882038		2	374,097585	4113,0687	3061,30673	21,5068092	390,600566	154,853712	90,384081	32,5921021	20,8810776	4,54522839	4,49327007	0,68505206	0
12		127334 25/01/2014 16:05	1,19324953	0,98837749		3	214,987681	4539,17741	1665,05073	161,608309	1152,09067	507,123988	271,376062	64,432659	13,8444298	2,29301926	0	0	0
13		127335 25/01/2014 16:10	0,40432377	0,69565233		3	34,0168545	3964,22754	1675,5917	145,467961	1650,23402	205,802417	36,8585108	0	0	0	0	0	0
14		127336 25/01/2014 16:15	0,33432343	0,56889831		3	19,9092964	15674,8004	6026,78848	270,236715	1695,71646	83,795643	6,44574529	0	0	0	0	0	0
15		127337 25/01/2014 16:20	0,40882942	0,4024238		3	21,4805276	112763,138	18638,6588	164,434918	966,156516	63,8826658	22,2895113	3,73081543	0	0	0	0	0
16		127338 25/01/2014 16:25	1,61712691	0,5973465		3	163,245121	150399,894	26098,1519	1021,98485	5372,05775	498,857376	125,625943	23,0723693	4,73571654	1,29444636	0,51889444	0	0
17		127339 25/01/2014 16:30	0,91594523	0,59364268		3	121,455238	151868,18	13891,9977	380,743675	1720,27822	278,208412	105,410477	31,9511351	6,57636561	1,08156658	0,35923462	0	0
18		127340 25/01/2014 16:35	1,12146657	0,68234099		3	252,092535	200061,762	12101,1892	227,299175	1111,70171	249,15525	129,19786	45,5169289	25,8717994	3,90830584	1,88592206	0	0
19		127341 25/01/2014 16:40	0,45715226	0,44719747		3	30,7244215	148204,57	6580,07821	142,819258	1384,15935	150,3242	29,9647759	3,47433671	0	0	0	0	0
20		126162 21/01/2014 14:25	2,35565947	2,97790432		4	10022,8033	3294,45342	1439,59851	55,7128772	132,528606	63,9620945	26,7569048	43,236352	26,1034991	10,8938526	6,49867007	6,08758751	7,05627488
21		126163 21/01/2014 14:30	5,29384602	5,11403953		4	142860,86	7869,47902	3846,80914	64,8235712	393,23392	102,716101	71,0028976	57,1703934	32,7144493	18,9168693	18,5636281	5,78104514	2,71697952
22		66552 28/06/2013 14:55	3,16651468	3,79335422		4	20546,5985	1781,51288	1033,25968	44,3327027	213,153509	85,2946949	23,2246536	9,25276854	4,06382409	3,28075197	6,81760647	5,64861538	2,37721481
23		66553 28/06/2013 15:00	10,6720128	3,30891117		4	46518,6959	17945,2898	9565,79685	160,175692	745,522907	115,214157	82,0369215	69,2877586	45,4107199	14,3763989	25,4151415	22,0167197	15,881254
24		154375 29/04/2014 13:30	0,18830152	0,64749113		5	10,1363932	111,41405	750,899563	64,8891158	851,822544	57,9657595	1,03778889	0	0	0	0	0	0
25		154376 29/04/2014 13:35	0,2916109	0,82642714		5	37,5463081	1056,32083	1091,67978	57,3105259	582,349625	147,914771	27,5164587	4,19773234	2,07557778	1,08156658	0	0	0
26		154377 29/04/2014 13:40	2,71586486	2,05053192		5	5098,35772	8062,86356	5052,72724	49,6090399	781,775289	293,268742	159,884952	81,3670308	49,3152456	13,2371771	15,4972747	6,32049436	1,67524311
27		154378 29/04/2014 13:45	8,22159472	3,41764991		5	116547,116	30679,0707	18339,8201	250,113365	1980,37179	571,142758	313,745421	157,507705	73,8346768	29,1834974	45,4361923	19,8626958	8,33416299
28		154379 29/04/2014 13:50	10,4889722	2,46189722		5	31702,7453	47373,7655	21144,1851	532,065	2121,08419	356,678878	299,261268	174,811063	120,96675	50,1830324	70,4507177	40,9000884	11,4856188
29		154380 29/04/2014 13:55	5,88236246	1,59637689		5	3570,43247	21280,1725	9797,83162	259,94856	1356,19468	394,222363	379,147243	257,202727	152,42949	66,995768	42,0082578	7,80034071	0,186802